

УДК 004.492.2

ЛИНЕЙНОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ КООРДИНАТ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА НА ЛИНЕЙНУЮ ЧАСТЬ МАГИСТРАЛЬНОГО НЕФТЕПРОВОДА

Кукало Иван Анатольевич,

аспирант каф. радиоэлектроники и защиты информации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40. E-mail: i@kukalo.ru

Гривцов Сергей Николаевич,

ведущ. специалист отдела координации охранный деятельности Службы безопасности АО «Транснефть – Центральная Сибирь», Россия, 634050, г. Томск, ул. Набережная р. Ушайки, 24. E-mail: GrivtsovSN@tom.transneft.ru

Необходимость динамического управления большим количеством трудовых и производственных ресурсов при проведении строительных, ремонтных и профилактических мероприятий на магистральных нефтепроводах делает актуальной задачу «привязки» географических координат подвижных объектов к линейной части магистрального нефтепровода.

Цель работы: создание методики линейного отображения географических координат подвижного объекта к линейной части магистрального нефтепровода на основе данных о дискретном наборе его отдельных географических координат.

Методы исследования: векторная алгебра, геометрия земного сфероида, погрешности арифметических операций, эвристические методы прямого поиска, методы сжатия информации, линейная интерполяция функций.

Результаты. Сформулирована задача линейного отображения координат подвижного объекта к линейной части магистрального нефтепровода. Приведено описание методики решения поставленной задачи на основе данных о дискретном наборе географических координат километровых участков линейной части магистрального нефтепровода. Представлены результаты использования методики для преобразования данных аэровизуального наблюдения участка линейной части магистрального нефтепровода «Александровское – Анжеро-Судженск», рассмотрены интерполяционные свойства методики при недостатке сведений о географических координатах километровых участков линейной части магистрального нефтепровода. Произведена оценка погрешности алгоритмов методики с учетом указанного допущения, которое не учитывает эллипсоидную форму земли при расчете расстояний между двумя точками на земной поверхности. Дана оценка погрешности для данных аэровизуального наблюдения участка линейной части магистрального нефтепровода «Александровское – Анжеро-Судженск». Для заданной конфигурации охранных зон магистральных трубопроводов предложен способ обработки информации о множестве географических координат подвижного объекта с учетом предельной величины удаленности объекта от оси трубопровода. Показано, что совместное использование разработанной методики линейного отображения и способа обработки данных дает возможность сжатия данных о траектории перемещения подвижного объекта после их преобразования во множество обследованных участков линейной части магистрального нефтепровода.

Ключевые слова:

Магистральный нефтепровод, линейное отображение, географические координаты, аэровизуальное наблюдение, сжатие данных с потерями.

Современная транспортировка нефти может осуществляться различными видами транспорта – трубопроводным, железнодорожным, водным, автомобильным, воздушным, однако транспортировку более 92 % добываемой в России нефти обеспечивает государственная трубопроводная компания ОАО «АК «Транснефть» [1]. Она располагает крупнейшей в мире системой магистральных нефтепроводов, длина которой составляет свыше 70 тыс. км [1].

Необходимость динамического управления большим количеством трудовых и производственных ресурсов при проведении строительных, ремонтных и профилактических мероприятий на линейной части магистрального нефтепровода (ЛЧ МН) делает актуальной задачу «привязки» географических координат подвижного объекта к «собственным координатам», ассоциированными с ЛЧ МН, которая характеризуется весьма протяженной структурой. Задача такого рода линейного отображения рассматривалась в наиболее распространенных геоинформационных системах [2] и системах управления базами данных [3], однако описание реализованных алгоритмов разработчиками

систем не приводится, поскольку указанные программные продукты являются проприетарными. В то же время реализация методики линейного отображения является ключевым требованием международных стандартов хранения данных в области трубопроводного транспорта [4], универсальных геоинформационных систем управления трубопроводами [5], национальных систем картографирования трубопроводов [6].

Основная цель данной статьи – описание разработанной методики линейного отображения географических координат подвижного объекта на структуру ЛЧ МН (далее методики линейного отображения) с учетом данных о дискретном наборе ее отдельных географических координат [7].

Постановка задачи

Оперативное позиционирование на местности осуществляется, как правило, с использованием устройств глобальной системы позиционирования, т. е. GPS/ГЛОНАСС-навигаторов. Современные навигаторы предоставляют информацию о широте, долготе и геодезической высоте объекта со средним

значением погрешности около 5 м [8], в географических системах координат ПЗ-90.11 [9], WGS84 [10], где за основу модели земного шара взят эллипсоид с параметрами, представленными в табл. 1.

Таблица 1. Параметры географических систем координат
Table 1. Parameters of geographical coordinate systems

Наименование системы координат Coordinate system	Большая полуось (экваториальная), м Major semi axis (equatorial), m	Малая полуось (полярная), м Minor semi axis (polar), m	Сжатие эллипсоида Ellipsoid compression
Параметры Земли 1990 г. (ПЗ-90.11) Parameters of the Earth	6378136	6356751,3618	1/298,25784
World Geodetic System 1984 г. (WGS 84)	6378137	6356752,3142	1/298,25722

Учитывая вышеизложенные входные параметры, представим подвижный объект в виде дискретного множества $O=\{O^t\}$, $O^t=(O_{lat}^t, O_{lng}^t, O_h^t)$, где $\{O^t\}$ – множество точек траектории объекта; t – время фиксации координат объекта; O_{lat}^t – широта объекта; O_{lng}^t – долгота объекта; O_h^t – геодезическая высота объекта. В то же время модель ЛЧ МН S представим в виде ломаной линии:

$$S = \{s_1, \dots, s_i, \dots, s_n\}, \quad s_i = (s_{lat}^i, s_{lng}^i, s_h^i, s_{km}^i),$$

где s_i – точка ЛЧ МН; s_{lat} – широта точки; s_{lng} – долгота точки; s_h – геодезическая высота точки; s_{km} – удаленность участка ЛЧ МН от его начала.

Учитывая технические характеристики ЛЧ МН, установим следующие ограничения для ломаной линии S – она может быть вырожденной, не может содержать пересечений и соответствует кратчайшему маршруту между первой и последней точками ломаной с учетом незначительных отклонений.

С учетом введенных обозначений, искомая методика отображения сводится к операции:

$$O^t \rightarrow (s_o^t, h_o^t), O^t s_o^t = \min_{s_j \in S} (O^t s_j), \quad (1)$$

где $s_o^t = (s_{lat}^t, s_{lng}^t, s_h^t, s_{km}^t)$, то есть преобразование координаты объекта из географической системы координат в линейную систему координат ЛЧ МН; h_o^t – выходной параметр методики, определяющий удаленность объекта от участка ЛЧ МН s_o^t , к которому была осуществлена привязка.

Алгоритм решения соотношения (1) представим структурной схемой (рис. 1).

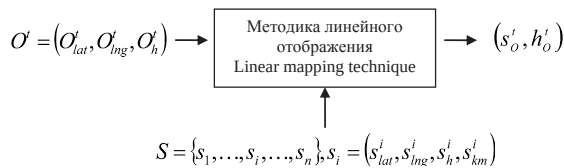


Рис. 1. Структурная схема методики линейного отображения

Fig. 1. Block diagram of the linear mapping technique

Описание методики линейного отображения

Расчет значения s_o^t будем осуществлять в два этапа модернизированным методом линейного поиска с оптимизированным алгоритмом поиска интервала неопределенности, основанным на имеющихся исходных данных:

- 1) определение первичного интервала неопределенности – поиск вершины ломаной линии $s_i^{\min}$, расстояние от которой до объекта O^t минимально, то есть

$$O^t s_i^{\min} = \min_{s_i \in S} (O s_i);$$

- 2) уточнение минимального значения функции – поиск на прилегающих звеньях ломаной линии точки x_o , расстояние от которой до объекта O^t минимально, то есть

$$O^t s_o^t = \min_s (O^t s_i), \quad s \in ([s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \cup [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]).$$

Для решения первой части задачи введем понятие функции удаленности координаты объекта O^t от вершины ломаной линии – $f(s_i) = O^t s_i$. Известно, что расчет расстояний между двумя точками на поверхности эллипсоида можно производить как в геодезической системе координат, так и в прямоугольной пространственной. Расчеты в прямоугольной системе координат являются менее требовательными к вычислительным ресурсам, поскольку они проводятся по формулам векторной алгебры [11], в то время как в геодезической системе координат требуется использование более сложных формул сферической геометрии [12]. С учетом вышеизложенного, воспользуемся прямоугольной системой координат.

Для перехода из геодезической системы координат в прямоугольную воспользуемся стандартными формулами [13]:

$$x_o = (N(O_{lat}^t) + O_h^t) \cos O_{lat}^t \cos O_{lng}^t;$$

$$y_o = (N(O_{lat}^t) + O_h^t) \cos O_{lat}^t \sin O_{lng}^t;$$

$$z_o = (N(O_{lat}^t)(1 - e^2) + O_h^t) \sin O_{lat}^t,$$

где x_o, y_o, z_o – прямоугольные пространственные координаты объекта; $N(O_{lat}^t)$ – радиус кривизны первого вертикала; $e^2 = 2\alpha - \alpha^2$ – эксцентриситет эллипсоида; α – сжатие эллипсоида; a – большая полуось эллипсоида.

Радиус кривизны первого вертикала рассчитывается по формуле

$$N(O_{lat}^t) = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 O_{lat}^t}},$$

где x_o, y_o, z_o – прямоугольные пространственные координаты объекта; x_s, y_s, z_s – прямоугольные пространственные координаты точки на ЛЧ МН.

Тогда значение $f(s_i)$ в декартовых координатах будет:

$$f(s_i) = \sqrt{(x_o - x_s)^2 + (y_o - y_s)^2 + (z_o - z_s)^2}. \quad (2)$$

Рассчитаем далее значение функции $f(s_i)$ для всех $s_i \in S$. Учитывая введенные ограничения на

характеристику ломаной линии S , установим в качестве допущения, что функция $f(s_i)$ является непрерывной и унимодальной. Тогда задача поиска $s_i^{\min}$ сводится к решению задачи одномерной оптимизации функции $f(s_i)$.

Поскольку значение функции не представлено аналитически для поиска $s_i^{\min}$, воспользуемся эвристическими методами прямого поиска для уменьшения интервала неопределенности, например, методом золотого сечения. Учитывая, что значение функции $f(s_i)$ определено через различные дискретные интервалы, воспользуемся приемом вложения дискретной функции в непрерывную [14].

Вход: $S=\{s_1, \dots, s_i, \dots, s_n\}$, $s_i=(s_{lat}^i, s_{lng}^i, s_h^i)$, начальные границы $s_{first}=s_1$, $s_{last}=s_n$, ε – количество требуемых дискретных значений s_i в интервале сужения.

Выход: интервал неопределенности $(s_{i_{inter}}', s_{i_{inter}}'')$.

Шаг 1. Рассчитаем точки деления:

$$s' = s_{last} - \frac{s_{last} - s_{first}}{\varphi}, \quad s'' = s_{first} + \frac{s_{last} - s_{first}}{\varphi},$$

где $\varphi = \frac{1+\sqrt{5}}{2}$ – пропорция золотого сечения.

Шаг 2. Если $q(s', s'') > \varepsilon$, переходим к шагу 3, иначе **Выход**, $s_{i_{inter}}' = s_i'$, $s_{i_{inter}}'' = s_i''$, где q – количество дискретных значений s_i на интервале (s', s'') , $s_i' = [s']$, $s_i'' = [s'']$, $[s]$ – наибольшее целое, не превосходящее число s , $[s]$ – наименьшее целое, которое не меньше числа s .

Шаг 3. Рассчитаем значения функции $f(s_i')$, $f(s_i'')$.

Шаг 4. Если $f(s_i') \geq f(s_i'')$, то $s_{first} = s_i'$, иначе $s_{last} = s_i''$, переход к шагу 1.

Итоговое значение минимума функции после уменьшения интервала неопределенности определим методом линейного поиска $s_i^{\min} = \min(s_{i_{inter}}' \dots s_{i_{inter}}'')$.

Далее поиск интервала неопределенности будем осуществлять по упрощенной формуле:

$$s_{i_{inter}}' = s_i^{\min} - V_{\max} t k_1;$$

$$s_{i_{inter}}'' = s_i^{\min} + V_{\max} t k_1,$$

где $k_1 \geq 1$ – поправочный коэффициент для учета погрешности средств определения географических координат; $V_{\max}$ – максимальная скорость подвижного объекта; t – время, прошедшее с момента последнего определения интервала неопределенности.

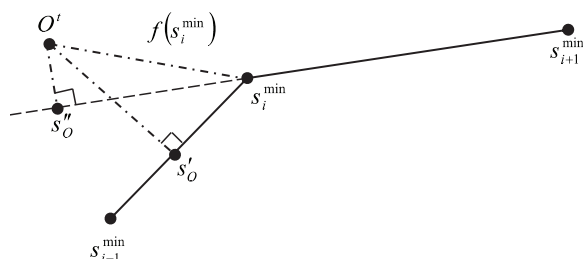


Рис. 2. Варианты расположения перпендикуляров к прилегающим звеньям ломаной линии

Fig. 2. Positions of perpendicular lines to the adjacent segments of a broken line

Решение второй части поставленной задачи предполагает построение отрезков минимальной длины, то есть перпендикуляров $O's_o'$, $O's_o''$ к отрезкам $[s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}]$ и $[s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$. Очевидно, что перпендикуляры могут располагаться как на звене ломаной линии – отрезок $O's_o'$ на рис. 2, так и за ее пределами – отрезок $O's_o''$.

Определим множество возможных вариантов расположения перпендикуляров и соответствующие им значения $O's_o'$:

1) если $s_o' \notin [s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \wedge s_o'' \notin [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$,

то $O's_o' = O's_i^{\min}$;

2) если $s_o' \in [s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \wedge s_o'' \in [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$,

то $O's_o' = \min(O's_o'; O's_o'')$;

3) если $s_o' \in [s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \wedge s_o'' \notin [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$,

то $O's_o' = O's_o'$;

4) если $s_o' \notin [s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}] \wedge s_o'' \in [s_i^{\min}, s_{i+1}^{\min}]$,

то $O's_o' = O's_o''$.

Рассмотрим алгоритм расчета $O's_o'$ для отрезка $[s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}]$. Алгоритм расчета $O's_o''$ будет осуществляться аналогичным образом. Расчет величины перпендикуляра $O's_o'$ произведем по формулам векторной алгебры, положения которой часто используются для решения задач геодезии [11]. Для удобства записи заменим $O's_{i-1}^{\min}$ на вектор $\bar{a}$, $[s_{i-1}^{\min}, s_i^{\min}]$ на $\bar{b}$, $O's_i^{\min}$ на $\bar{c}$, $O's_o'$ на $\bar{h}$. Очевидно, что вектор $\bar{h}$ может как пересекать, так и не пересекать вектор $\bar{b}$ в трехмерном пространстве. Варианты расположения вектора $\bar{h}$ отображены на рис. 3.

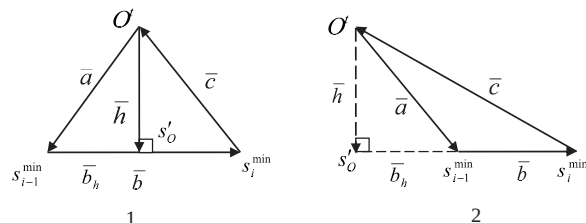


Рис. 3. Варианты расположения векторов

Fig. 3. Positions of vectors

Очевидно, что при $\bar{a} \cdot \bar{b} \leq 0$ угол между векторами либо острый, либо прямой, и вектор $\bar{h}$ пересекает $\bar{b}$ в точке s_o' , что соответствует случаю 1 на рис. 3, в то время как при $\bar{a} \cdot \bar{b} > 0$ точка s_o' лежит за пределами $\bar{b}$ и соответствует случаю 2 на рис. 3.

Определим векторы $\bar{a}$, $\bar{b}$ по двум точкам в трехмерном пространстве, тогда значение величины h можно рассчитать по формуле расстояния между линией и точкой в трехмерном пространстве [15]:

$$h = \|\bar{h}\| = \frac{\|\bar{a} \times \bar{b}\|}{\|\bar{b}\|},$$

где $\bar{a} \times \bar{b}$ – операция векторного произведения; $\|\bar{x}\|$ – длина вектора $\bar{x}$;

$$\bar{a} = ((x_{O^t} - x_{s_{i-1}^{\min}}), (y_{O^t} - y_{s_{i-1}^{\min}}), (z_{O^t} - z_{s_{i-1}^{\min}}));$$

$$\bar{b} = ((x_{s_i^{\min}} - x_{s_{i-1}^{\min}}), (y_{s_i^{\min}} - y_{s_{i-1}^{\min}}), (z_{s_i^{\min}} - z_{s_{i-1}^{\min}})).$$

Значение b_n определим по формуле вычисления проекции вектора на плоскость в трехмерном пространстве [16]:

$$b_h = \|\bar{b}_h\| = \left\| \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{\|\bar{b}\|^2} \bar{b} \right\|,$$

где $\bar{a} \cdot \bar{b}$ – операция скалярного произведения векторов.

Итоговое значение $s'_{O_{km}}$ рассчитаем по формуле:

$$s'_{O_{km}} = s_{i-1, km}^{\min} + \frac{b_h}{b} (s_{i, km}^{\min} - s_{i-1, km}^{\min}). \quad (3)$$

Определим значение географической координаты точки $s'^t_{O_{xyz}}$ в прямоугольных пространственных координатах:

$$s'_{O_{xyz}} = \left(x_{s_i^{\min}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{\|\bar{b}\|^2} \bar{b}_x, y_{s_i^{\min}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{\|\bar{b}\|^2} \bar{b}_y, z_{s_i^{\min}} + \frac{\bar{a} \cdot \bar{b}}{\|\bar{b}\|^2} \bar{b}_z \right),$$

где $s'_{O_{xyz}}$ – прямоугольные пространственные координаты точки s'_0 .

Для перехода из прямоугольной системы координат в геодезическую воспользуемся стандартным методом [13]:

$$s'_{O_{ellipse}} = G_{5.1.2}(s'_{O_{xyz}}), \quad (4)$$

где $s'_{O_{ellipse}} = (s'_{O_{lat}}, s'_{O_{lng}}, s'_{O_h})$ – геодезические координаты точки s'_0 ; $G_{5.1.2}$ – итеративный метод преобразования координат из прямоугольной системы координат в геодезическую [13].

Погрешностью метода $G_{5.1.2}$ можно пренебречь, поскольку она составляет не более 0,003 м [13], что значительно ниже погрешности GPS/ГЛОНАСС-навигаторов.

Объединяя результаты формул (3) и (4), получим итоговое значение $s'_0 = (s'^t_{O_{lat}}, s'^t_{O_{lng}}, s'^t_{O_h}, s'^t_{O_{km}})$.

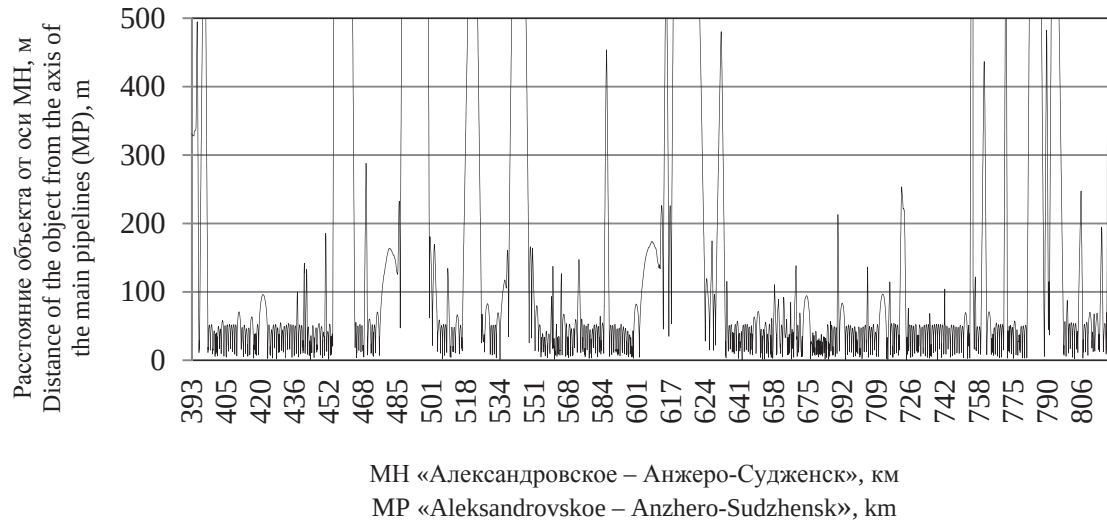


Рис. 4. Результаты расчета h_0^t

Fig. 4. Results of h_0^t calculation

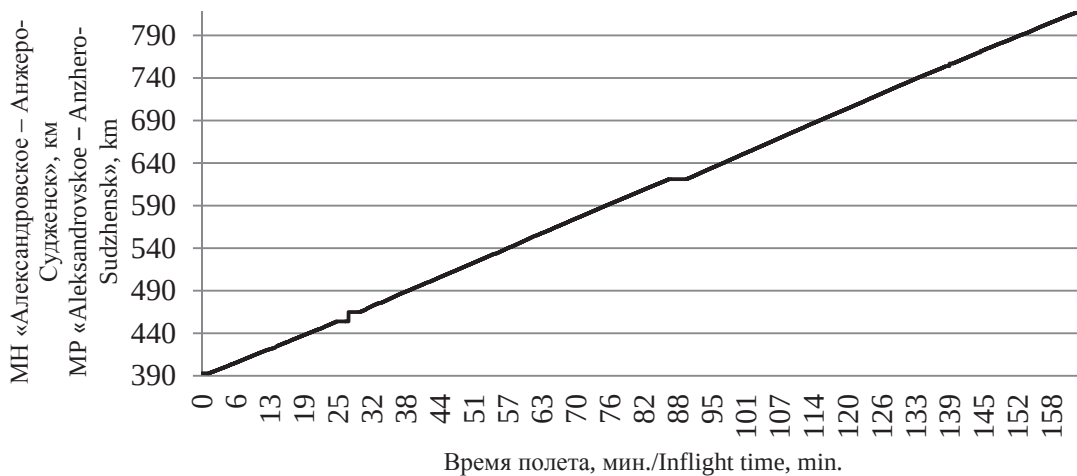


Рис. 5. Результаты расчета $s'_{O_{km}}$

Fig. 5. Results of $s'_{O_{km}}$ calculation

Апробация методики линейного отображения

Рассмотрим пример практического применения изложенной методики для поиска значения $h_0^t = O^t s_0^t = \min(Os_0^t; Os_0^t; Os_i^{\min})$ и отображения $O^t \rightarrow s_0^t \in (s_i^{\min}, s_0^t, s_0^t)$ для данных аэровизуального наблюдения МН «Александровское – Анжеро-Судженск», проводимого эксплуатационными подразделениями АО «Транснефть – Центральная Сибирь». На рис. 4, 5 представлены графики соответствующих значений h_0^t и s_{0km}^t .

Для оценки интерполяционных характеристик методики при недостатке сведений о географических координатах километровых участков ЛЧ МН (например, в труднодоступной, болотистой местности) на рис. 6 приведен график значений s_{0km}^t и $s_{ikm}^{\min}$ для данных аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» 580–650 км.

Красной линией на графике представлено значение функции $s_{ikm}^{\min}(t)$, которое определяет значение ближайшего к подвижному объекту дискретного километрового участка ЛЧ МН. Синей линией на графике представлено значение функции $s_{0km}^t(t)$, которое определяет значение километрового участка ЛЧ МН после привязки подвижного объекта с помощью разработанной методики.

Погрешность методики отображения

Дадим оценку погрешности алгоритма [17] преобразования $O^t \rightarrow s_0^t, O^t s_0^t = \min_{s_j \in S} (O^t s_j)$, связанную с переходом к прямоугольным пространственным координатам, которые не учитывают эллипсоидную форму Земли.

Прежде всего определим погрешность, возникающую при вычислении единичного расстояния

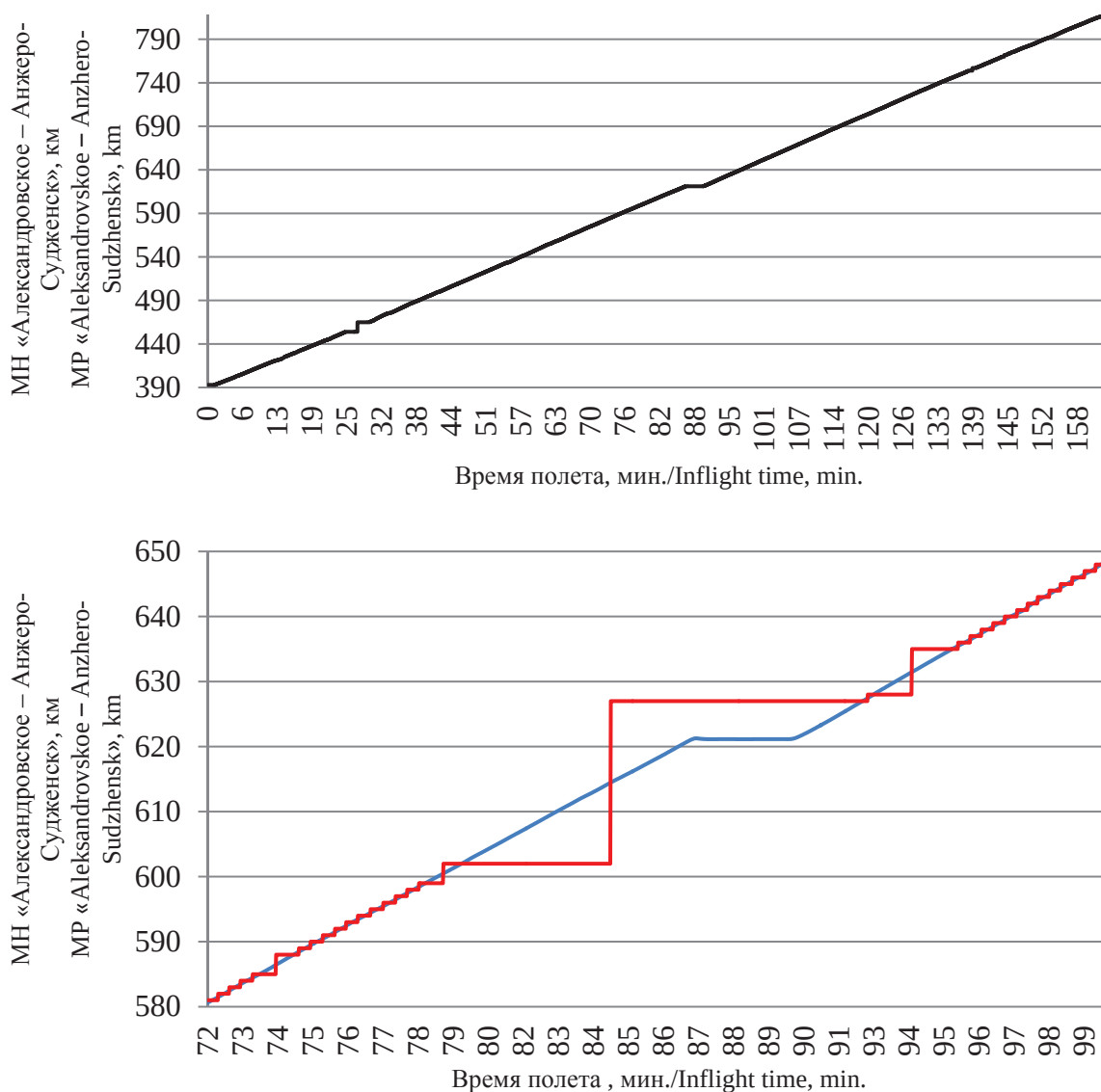


Рис. 6. Интерполяция координаты подвижного объекта к ЛЧ МН

Fig. 6. Interpolation of the mobile object coordinate to the LP MP

в прямоугольных пространственных координатах d_{xyz} по известной широте, долготе и высоте объекта. Для определения истинного значения расстояния $d_{ellipse}$, относительно которого будет рассчитываться погрешность, воспользуемся формулой Т. Висенти [12]:

$$d_{ellipse}(p_1, p_2) = V_{inverse}^{4-1}(p_1, p_2),$$

$$p_1 = (p_{lat}^1, p_{lng}^1), p_2 = (p_{lat}^2, p_{lng}^2),$$

где p_1, p_2 – координаты точек, между которыми определяется расстояние; $V_{inverse}^{4-1}$ – формула определения

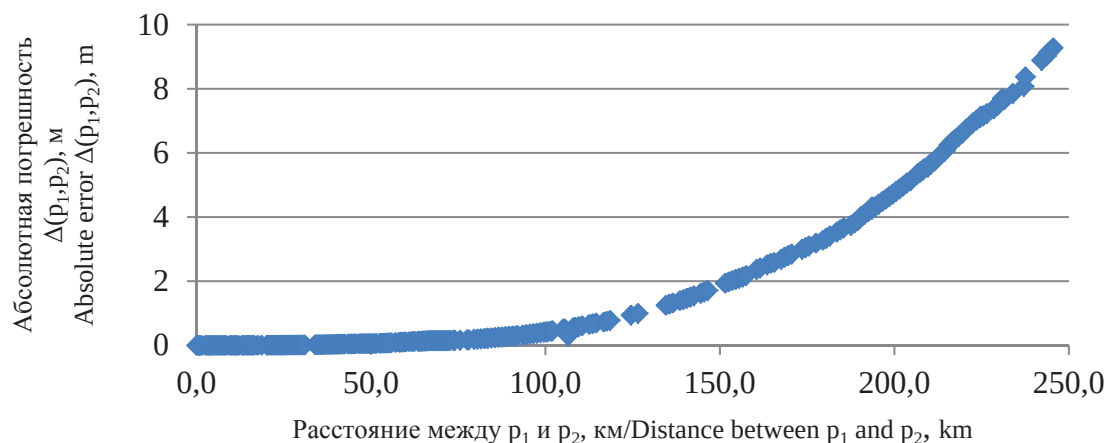


Рис. 7. Зависимость $\delta(p_1, p_2)$ от $d_{ellipse}(p_1, p_2)$

Fig. 7. Dependence of $\delta(p_1, p_2)$ on $d_{ellipse}(p_1, p_2)$

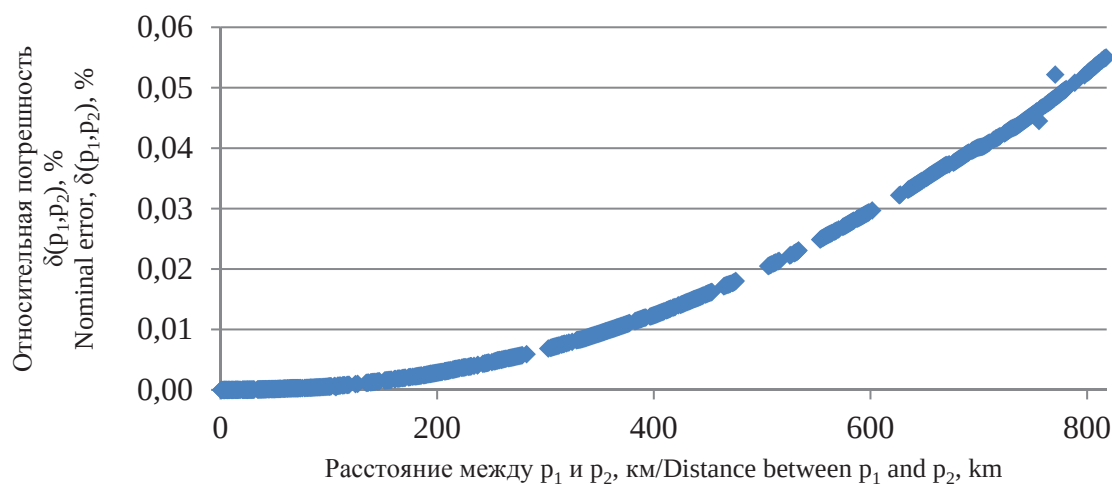
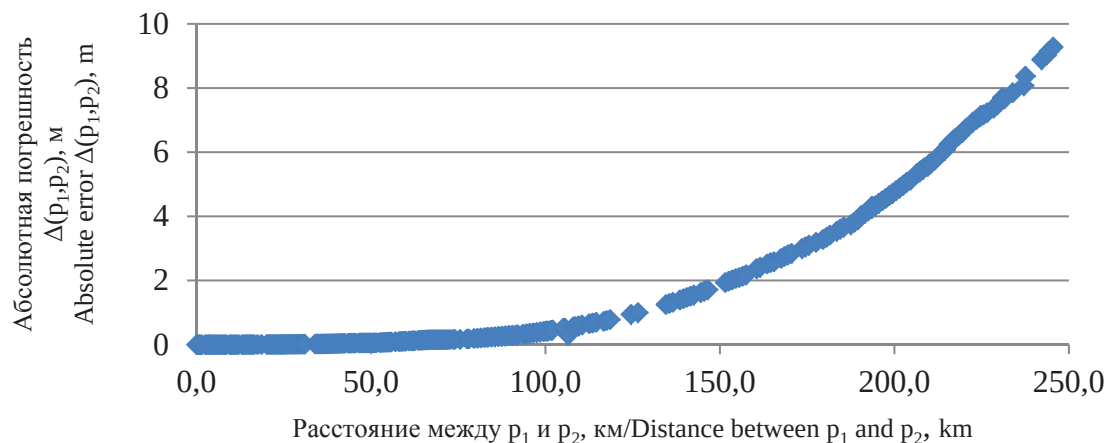


Рис. 8. Зависимость $\delta(p_1, p_2)$ от $d_{ellipse}(p_1, p_2)$

Fig. 8. Dependence of $\delta(p_1, p_2)$ on $d_{ellipse}(p_1, p_2)$

расстояния между двумя точками на эллипсоиде с заданными географическими координатами [12].

Погрешностью формулы $V_{inverse}^{4-1}$ можно пренебречь, поскольку она составляет 0,5 мм [12], что значительно ниже погрешности GPS/ГЛОНАСС-навигаторов, которые определяют входные параметры методики.

Очевидно, что расстояние между двумя точками в прямоугольных пространственных координатах d_{xyz} будет приближенным значением по недостатку к истинному значению $d_{ellipse}$, то есть $d_{xyz} < d_{ellipse}$, поскольку прямая линия определяет кратчайшее расстояние между двумя точками в прямоугольных координатах и тем самым «срезает» поверхность земного эллипсоида.

Тогда значение абсолютной погрешности $\Delta(p_1, p_2)$ рассчитаем по формуле [18]:

$$\Delta(p_1, p_2) = (d_{ellipse}(p_1, p_2) - d_{xyz}(p_1, p_2)), \Delta(p_1, p_2) \geq 0, \quad (5)$$

где $d_{xyz}(p_1, p_2)$ – расстояние в прямоугольных пространственных координатах, рассчитывается по формуле (2).

Соответственно, относительную погрешность $\delta(p_1, p_2)$ рассчитаем по формуле [18]:

$$\delta(p_1, p_2) = \frac{\Delta(p_1, p_2)}{d_{ellipse}(p_1, p_2)}, d_{ellipse}(p_1, p_2) \geq 0, \quad (6)$$

Очевидно, что величины значений $\Delta(p_1, p_2)$ и $\delta(p_1, p_2)$ зависят в большей степени от удаленности точек на поверхности эллипсоида и в меньшей степени – от широты/долготы точек, поскольку разное положение точек на эллипсоиде определяет дуги разной длины из-за различной величины полуосей эллипсоида. Для наглядной оценки возникающей погрешности на рис. 7, 8 представлены графики зависимости величин $\Delta(p_1, p_2)$ и $\delta(p_1, p_2)$ от степени удаленности точек на поверхности эллипсоида, расположенных вдоль оси МН «Александровское – Анжеро-Судженск».

Таким образом, возникающая погрешность становится соразмерной погрешности GPS/ГЛОНАСС-навигаторов при расчете расстояний величиной более 200 км.

Далее рассчитаем значения Δh , δh по формулам (5), (6):

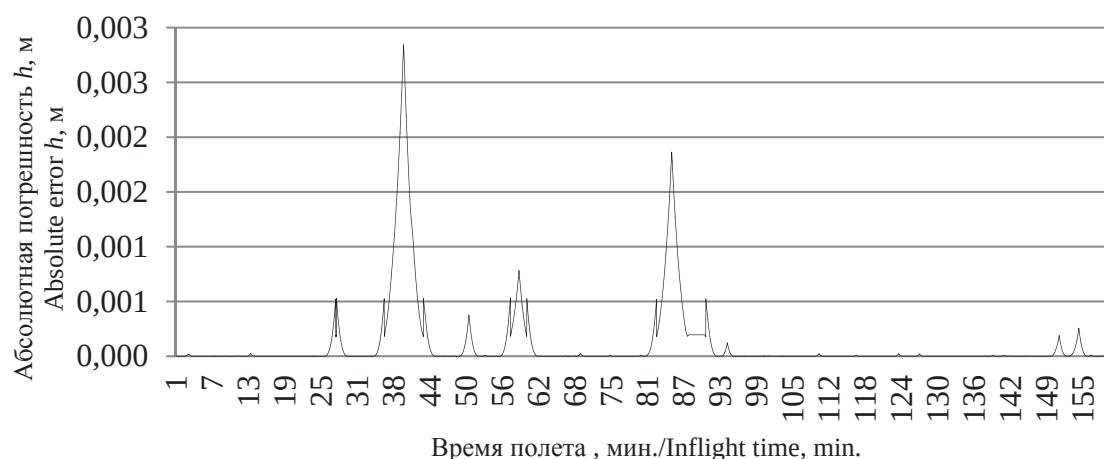


Рис. 9. Результаты расчета погрешности Δh

Fig. 9. Results of the error Δh calculation

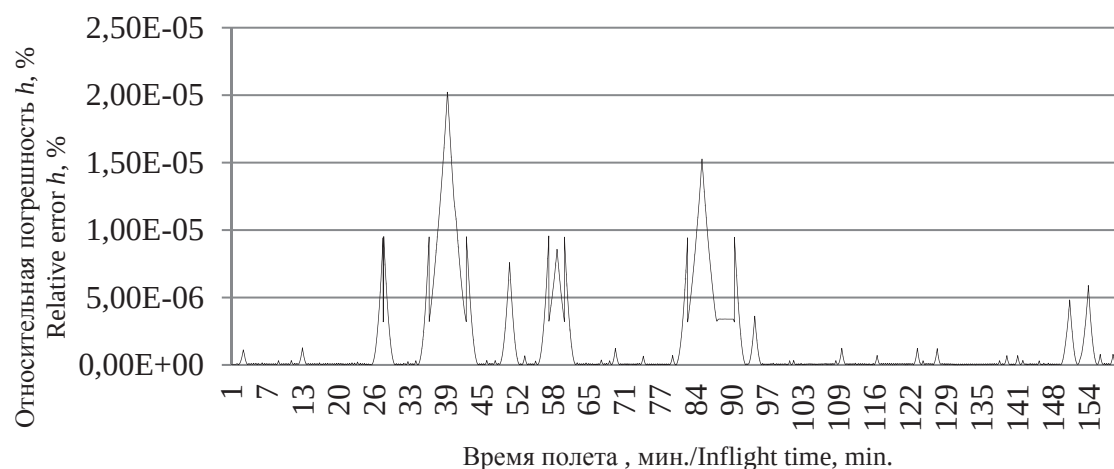


Рис. 10. Результаты расчета погрешности δh

Fig. 10. Results of the error δh calculation

$$\Delta h = (d_{\text{ellipse}}(s_{O_{\text{ellipse}}}^t, O^t) - d_{\text{xyz}}(s_{O_{\text{xyz}}}^t, O^t));$$

$$\delta h = \frac{\Delta h}{d_{\text{ellipse}}(s_{O_{\text{ellipse}}}^t, O^t)}.$$

И значения Δs_O^t , δs_O^t по аналогичным формулам:

$$\Delta s_O^t = (d_{\text{ellipse}}(s_{O_{\text{ellipse}}}^t, s_i^{\min}) - d_{\text{xyz}}(s_{O_{\text{xyz}}}^t, s_i^{\min}));$$

$$\delta s_O^t = \frac{\Delta s_O^t}{d_{\text{ellipse}}(s_{O_{\text{ellipse}}}^t, s_i^{\min})}.$$

На рис. 9–12 представлены графики значения погрешностей Δh , δh , Δs_O^t , δs_O^t для данных типового аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» (393–818 км).

Учитывая, что полученные значения Δh , δh , Δs_O^t , δs_O^t много меньше погрешности GPS/ГЛОНАСС-навигаторов, можно пренебречь погрешностью, связанной с переходом к прямоугольной системе координат.

Обработка данных обследования линейной части магистрального нефтепровода

Использование разработанной методики для решения задачи отображения географических координат позволяет обеспечить выделение информативных данных из множества географических координат подвижного объекта. При этом критерием отбора выбираем значение предельной величины удаленности объекта от оси ЛЧ МН $h \leq h_{\max}$.

$$h_{\max} = k_2 \cdot H,$$

где $k_2 \geq 1$ – поправочный коэффициент типа проводимого мероприятия для учета максимального отклонения объекта от оси ЛЧ МН; H – ширина охранной зоны линейного объекта.

Значения охранных зон магистральных трубопроводов (в том числе МН) устанавливаются в специальных документах Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор) [19]. Значения H для ос-

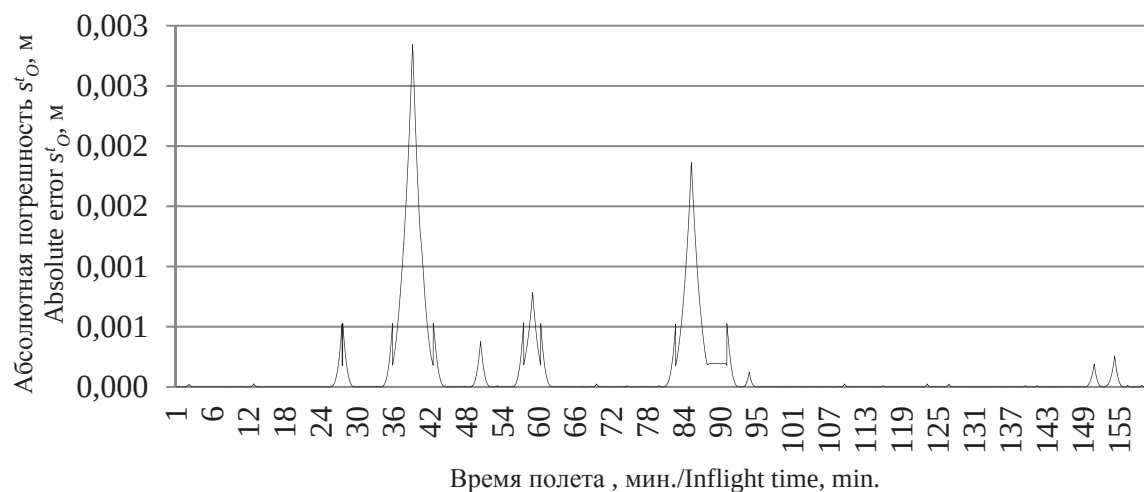


Рис. 11. Результаты расчета погрешности Δs_O^t

Fig. 11. Results of the error Δs_O^t calculation

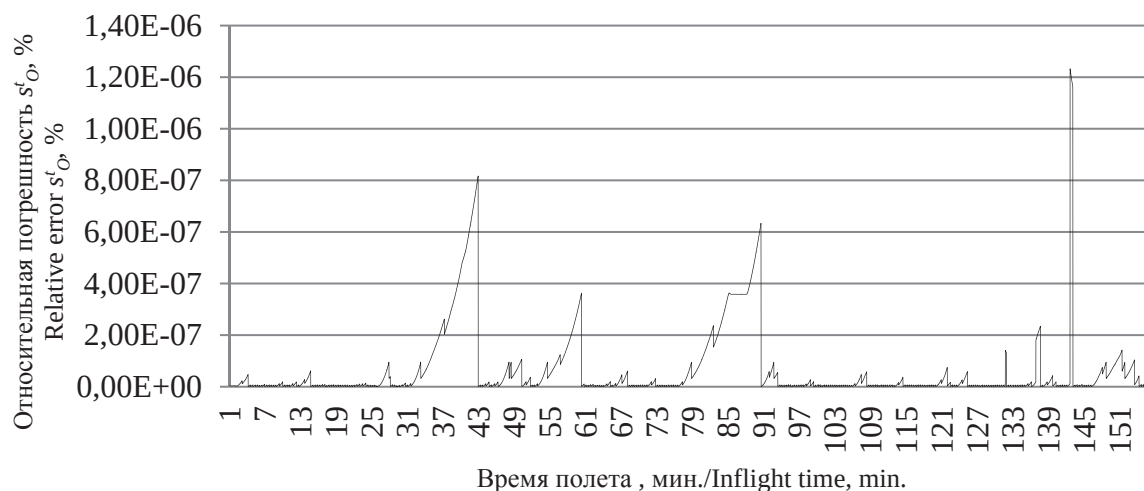


Рис. 12. Результаты расчета погрешности δs_O^t

Fig. 12. Results of the error δs_O^t calculation

новых типов магистральных трубопроводов в РФ приведены в табл. 2.

Таблица 2. Ширина охранной зоны магистральных трубопроводов

Table 2. Width of the protected zone of the main pipelines

Тип объекта Object type	Совокупная ширина охранной зоны, м Overall width of the protected zone, m
Трассы трубопроводов, транспортирующих нефть, природный газ, нефтепродукты, нефтяной и искусственный углеводородные газы Pipeline routes, transporting oil, natural gas, oil products, oil and synthetic hydrocarbon gases	50
Трассы трубопроводов, транспортирующих сжиженные углеводородные газы, нестабильные бензин и конденсат Pipeline routes, transporting liquefied hydrocarbon gases, wild gasoline and unstable condensate	200
Подводные переходы трубопроводов Submerged crossing	200
Технологические установки подготовки продукции к транспорту, головные и промежуточные перекачивающие и наливные насосные станции, резервуарные парки, компрессорные и газораспределительные станции, узлы измерения продукции, наливные и сливные эстакады, станции подземного хранения газа, пункты подогрева нефти, нефтепродуктов Technological units for preparing products for transporting, main and intermediate transfer and bulk pump stations, tank batteries, compression and gas-distribution stations, product metering units, loading and discharge racks, stations of gas underground storage, oil and oil product heating stations	200

Для оценки качества обработки входных данных авторами были проанализированы данные аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» при $h_{\max}=200$ м. Результаты анализа представлены в табл. 3.

На основе полученных результатов можно оценить фактически осматриваемую долю ЛЧ МН, которая колеблется от 80 до 90 % от запланированных показателей для представленных данных аэровизуального наблюдения. Следует также отметить, что использование такого подхода позволяет отбросить от 20 до 30 % неинформативных данных, учитывая достаточно большое среднее значение удаленности подвижного объекта от оси ЛЧ МН.

Алгоритм сжатия данных обследования линейной части магистрального нефтепровода

Рассмотрим возможность сжатия информативных данных, полученных в результате преобразования географических координат подвижных объектов по описанной выше методике. Учитывая, что эти данные представляют собой значения ши-

Таблица 3. Характеристики выделения информативных данных

Table 3. Characteristics of citing data selecting

Планируемый участок облета, км Proposed flyover area, km	Среднее отклонение Average deviation	Медиана отклонения Deviation median	Фактически осматриваемый участок ЛЧ МН, км Really examined area of LP MP, km	Доля координат в охранный зоне МН Part of coordinate in the protected zone of the MP	
				Доля фактически осматриваемой ЛЧ МН Part of the really examined LP MP	
				%	
	от оси МН для всех координат/для координат в охранный зоне, м from the MP axis for all coordinates/for coordinates in the protected zone, m				
393-0	1011,78/38,74	47,14/45,13	359,6	74	91
393-818	237,84/46,61	51,58/56,66	341,240	78	80
393-818	271,35/58,46	61,42/47,99	336,401	74	79
393-0	438,11/45,72	49,6/39,39	358,872	70	91
393-0	272,11/55,17	51,93/44,63	343,042	75	87
393-0	1117,02/47,11	47,54/41,44	358,841	72	91
393-818	383,02/57,15	70,60/43,36	341,16	65	80
393-818	270,49/54,56	53,83/45,36	346,838	70	81

роты, долготы и высоты объекта $s_{O\text{ellipse}}^t$, зафиксированные через дискретные промежутки времени Δt от начальной точки отсчета τ_0 , сформулируем задачу преобразования уравнением:

$$(S_O^t, H_O^t, T_O^t) \rightarrow (S_O'^t, T_O'^t),$$

где $S_O^t = \{s_{O\text{ellipse}}^1, \dots, s_{O\text{ellipse}}^t, \dots, s_{O\text{ellipse}}^n\}$ – множество географических координат подвижного объекта; $H_O^t = \{h_O^1, \dots, h_O^t, \dots, h_O^n\}$ – множество значений удаленности объекта от оси ЛЧ МН; $T_O^t = \{\tau_0^1, \tau_0^t, \dots, \tau_0^n\}$ – множество отметок времени, для которых определялась координата подвижного объекта;

$$S_O'^t = \{(s_{O_{km}}^1, s_{O_{km}}'^1), \dots, (s_{O_{km}}^t, s_{O_{km}}'^t), \dots, (s_{O_{km}}^n, s_{O_{km}}'^n)\}$$

– множество обследованных участков ЛЧ МН;

$$T_O'^t = \{(t_0^1, t_0'^1), \dots, (t_0^t, t_0'^t), \dots, (t_0^n, t_0'^n)\}$$

– множество соответствующих им промежутков времени затраченных на обследование.

Определим алгоритм преобразования $S_O^t \rightarrow S_O'^t$.
Вход:

$$S_O^t = \{s_{O\text{ellipse}}^1 \dots s_{O\text{ellipse}}^n\}, T_O^t = (\tau_0^1, \{t_0^1 \dots t_0^n\}),$$

$$H_O^t = \{h_O^1 \dots h_O^n\}, h_{\max}.$$

Выход:

$$S_O'^t = \{(s_{O_{km}}^1, s_{O_{km}}'^1) \dots (s_{O_{km}}^n, s_{O_{km}}'^n)\},$$

$$T_O'^t = \{(t_0^1, t_0'^1) \dots (t_0^n, t_0'^n)\}.$$

Шаг 1. Если $s_{O km}^t = s_{O km}^1$, то $h_{O km}^{t-1} = h_{O km}^1 + 1$, $s_{O km}^t = s_{O km}^1$, $t_{O km}^t = t_{O km}^1$.

Шаг 2. Если

$$((h_{O km}^t > h_{O km}^1) \wedge (h_{O km}^{t-1} \leq h_{O km}^1)) \vee (s_{O km}^t = s_{O km}^1),$$

то, переход на **Шаг 3**, иначе $s_{O km}^t = s_{O km}^{t+1}$.

Шаг 3.

$$s_{O km}^{t+1} = s_{O km}^t, \quad t_{O km}^{t+1} = t_{O km}^t + (t_{O km}^t \cdot \Delta \tau),$$

$$S_{O km}^t = S_{O km}^1 + (s_{O km}^t, s_{O km}^1), \quad T_{O km}^t = T_{O km}^1 + (t_{O km}^t, t_{O km}^1),$$

если $s_{O km}^t \neq s_{O km}^1$, то $s_{O km}^t = s_{O km}^1$, $t_{O km}^t = t_{O km}^1$, переход на **Шаг 2**, иначе **Выход**.

Объем данных для хранения информации об обследовании ЛЧ МН определим по формулам:

$$Q(S_{O km}^t, H_{O km}^t, T_{O km}^t) = Q(\text{datetime}) +$$

$$+ n(3 \cdot Q(\text{float}) + Q(\text{float}) + Q(\text{int}));$$

$$Q(S_{O km}^t, T_{O km}^t) = n'(2 \cdot Q(\text{float}) + 2 \cdot Q(\text{datetime})), \quad (7)$$

где $Q(x)$ – количество информации в байтах для хранения величины x ; n – количество точек наблюдения подвижного объекта; n' – количество осматриваемых участков ЛЧ МН.

Тогда эффективность сжатия информативных данных составит:

$$k_{arch} = \frac{Q(S_{O km}^t, H_{O km}^t, T_{O km}^t)}{Q(S_{O km}^1, T_{O km}^1)} = \frac{5}{6} \cdot \frac{n}{n'}.$$

Восстановление сжатых данных о положении объекта $s_{O km}^{t*}$ в момент времени t производится с помощью линейного уравнения:

$$s_{O km}^{t*} = s_{O km}^1 + (s_{O km}^{t''} - s_{O km}^1) \cdot \frac{(t - t_{O km}^1)}{(t_{O km}^{t''} - t_{O km}^1)}, \quad t_{O km}^1 < t < t_{O km}^{t''}, \quad (8)$$

где $s_{O km}^{t*}$ – расчетное значение $s_{O km}^t$, восстановленное из сжатой информации об осматриваемых участках.

Значение географической координаты точки $s_{O km}^{t*}$ в прямоугольных координатах:

$$s_{O km}^{t*} = \left(x_{s_i} + \frac{s_{O km}^{t*} - s_i'}{s_i'' - s_i'} \bar{s}, y_{s_i} + \frac{s_{O km}^{t*} - s_i'}{s_i'' - s_i'} \bar{s}, z_{s_i} + \frac{s_{O km}^{t*} - s_i'}{s_i'' - s_i'} \bar{s} \right),$$

где $s_{O km}^{t*}$ – прямоугольные пространственные координаты точки $s_{O km}^{t*}$; s_i' , s_i'' – прилегающие к $s_{O km}^{t*}$ вершины ломаной S , такие, что $s_i' < s_{O km}^{t*} < s_i''$, $\bar{s} = ((x_{s_i} - x_{s_i'}), (y_{s_i} - y_{s_i'}), (z_{s_i} - z_{s_i'}))$.

$s_{O km}^{t*} = (s_{O km}^{t* lat}, s_{O km}^{t* lng}, s_{O km}^{t* h})$ рассчитаем по формуле (4) и, объединяя полученное значение с полученным по формуле (8) значением $s_{O km}^{t*}$, определим итоговую величину $s_{O km}^{t*} = (s_{O km}^{t* lat}, s_{O km}^{t* lng}, s_{O km}^{t* h}, s_{O km}^{t* km})$.

Апробация алгоритма сжатия данных

В качестве хранилища, на основе которого проводилось сравнение объемов размещения данных, использовался сервер баз данных Microsoft SQL Server 2012 Express. Для хранения целых чисел использовался тип int (4 байта), чисел с плавающей запятой – тип данных float (4 байта), для хранения даты и времени – тип данных datetime

(8 байт). Объем данных для указанного хранилища рассчитаем по формуле (7):

$$Q(S_{O km}^t, H_{O km}^t, T_{O km}^t) = 20 \cdot n;$$

$$Q(S_{O km}^t, T_{O km}^t) = 24 \cdot n'.$$

Результаты применения разработанного алгоритма сжатия для набора аэровизуальных наблюдений ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» в сентябре–ноябре 2014 г. представлены в табл. 4.

Таблица 4. Сравнение различных форм представления данных

Table 4. Comparison of different forms of data introduction

Планируемый участок облета, км Proposed flyover area, km	n	n'	$Q(S_{O km}^t, H_{O km}^t, T_{O km}^t)$	$Q(S_{O km}^t, T_{O km}^t)$	k_{arch}
Кбайт/Kbyte					
393–0	11842	27	236,84	0,648	365
393–818	9844	23	196,88	0,552	356
	5740	23	114,8	0,552	207
393–0	10343	24	206,86	0,576	359
	10560	26	211,2	0,624	338
	3714	20	74,28	0,48	154
393–818	13024	23	260,48	0,552	471
	13389	32	267,78	0,768	348

Из приведенных данных можно сделать вывод о том, что при отсутствии необходимости определения координаты количество информации для хранения данных передвигания подвижного объекта может быть уменьшено в несколько сотен раз и объем преобразованных данных составит менее одного процента от исходного.

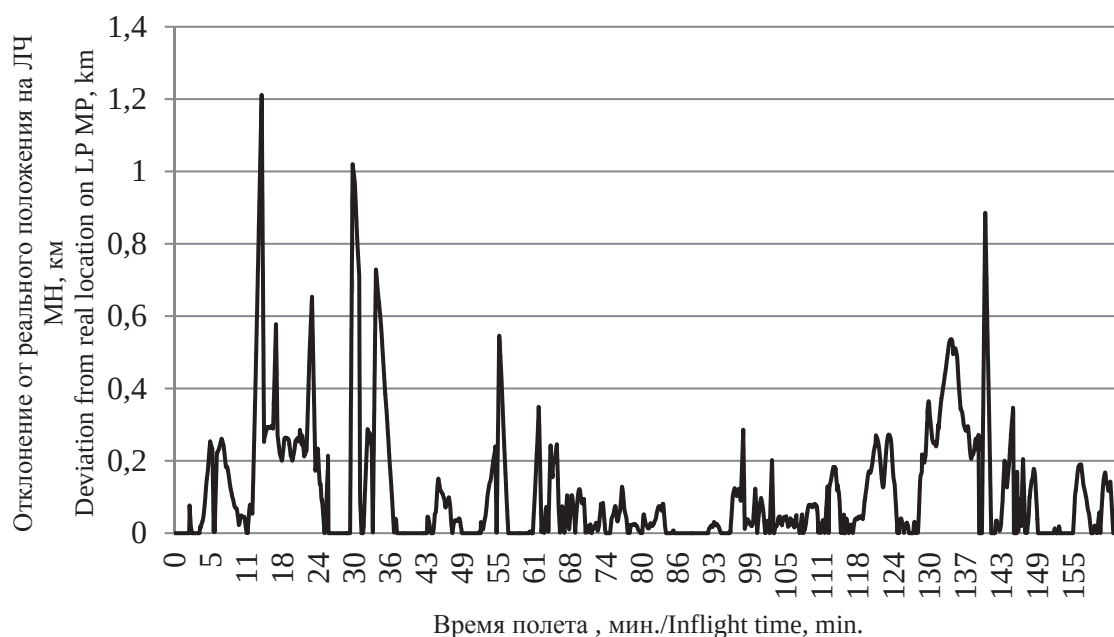
На рис. 13 представлены результаты расчета погрешности интерполяции траектории мероприятия $|s_{O km}^t - s_{O km}^{t*}|$, то есть отклонения расчетной координаты на ЛЧ МН от реального положения объекта.

В табл. 5 отражена информация о положении объекта в виде элементов сжатого множества $S_{O km}^t$, $T_{O km}^t$, рассчитанного на основе данных аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» 396–613 км, использованного ранее для построения графика на рис. 13. Для каждого осматриваемого участка также была рассчитана средняя скорость перемещения подвижного объекта $V_{O km}^t$.

Таблица 5. Результаты расчета $S_{O km}^t$, $T_{O km}^t$, $V_{O km}^t$

Table 5. Results of $S_{O km}^t$, $T_{O km}^t$, $V_{O km}^t$ calculation

$S_{O km}^t$	$S_{O km}^t$	$t_{O km}^t$	$t_{O km}^t$	$V_{O km}^t$, км/ч (km/h)
км/км		мин/мин		
396,611	454	3	26	153,9496
464,996	469,65	29	31	140,7933
470,563	486,877	32	38	165,4377
500,416	502,4	43	44	166,1023
503,292	517,199	44	49	163,6118
525,292	538,788	52	57	160,8795
548,78	550,499	61	61	176,8114
550,907	585,557	61	74	162,6336
587,36	613,265	75	84	159,6884

Рис. 13. Результаты расчета $|s'_{0\text{ km}} - s^*_{0\text{ km}}|$ Fig. 13. Results of $|s'_{0\text{ km}} - s^*_{0\text{ km}}|$ calculation

Описанная выше методика и алгоритмы выделения и сжатия информативных данных в настоящее время проходят апробацию в АО «Транснефть – Центральная Сибирь» в виде автоматизированной системы учета и анализа мероприятий по охране ЛЧ МН [20]. С ее помощью решена задача преобразования GPS-треков, полученных в результате проведения мероприятий на ЛЧ МН, во множество обследованных участков, а также реализованы функции отображения информации об обследованных участках на свободно распространяемых географических картах [21].

Выводы

Сформулирована задача линейного отображения координат подвижного объекта к ЛЧ МН. Приведено описание методики для решения поставленной задачи на основе данных о дискретном наборе географических координат километровых участков ЛЧ МН. Предложенная методика реализует модифицированный метод линейного поиска точки ломаной линии до точки расположения подвижного объекта.

Представлены результаты использования данной методики для преобразования данных аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск», рассмотрены интерполяционные характеристики методики при недостатке сведений о географических координатах километровых участков ЛЧ МН.

Дана оценка погрешности алгоритмов методики, связанных с приближенным учетом эллипсоидной формы Земли при расчете расстояний между двумя точками на ее поверхности. Показано, что возникающая погрешность становится соразмерной погрешности GPS/ГЛОНАСС-навигаторов

при расчете расстояний величиной более 200 км. Приведены результаты значения погрешности для данных аэровизуального наблюдения участка ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск».

На основе значений охранных зон магистральных трубопроводов предложен способ выделения информативных данных из множества географических координат подвижного объекта с учетом предельной величины удаленности объекта от оси ЛЧ МН. Применение указанного способа для анализа набора данных об аэровизуальном наблюдении ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск» позволило выявить и отбросить около 30 % неинформативных данных. Также с его помощью удалось оценить фактически осматриваемую долю ЛЧ МН, которая составила около 80 % от плановых показателей.

Показано, что дополнительным преимуществом совместного использования разработанной методики линейного отображения и способа выделения информативных данных является возможность сжатия информативных данных после их преобразования во множество обследованных участков ЛЧ МН и множество соответствующих им промежутков времени. Определена формула эффективности сжатия данных, которое достигается за счет линейной интерполяции координаты объекта. Рассмотрены результаты расчета отклонения смоделированного положения объекта от реального для данных аэровизуального наблюдения ЛЧ МН «Александровское – Анжеро-Судженск».

Предложенная выше методика и алгоритмы реализованы в виде компоненты автоматизированной системы учета и анализа мероприятий по охране ЛЧ МН в АО «Транснефть – Центральная Сибирь».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анализ финансового состояния и результатов деятельности группы ОАО «АК «Транснефть». URL: <http://www.transneft.ru/investors/257/> (дата обращения: 28.05.2015).
2. Utilizing ArcGIS Location Referencing for Pipelines (ALRP). URL: <http://www.pods.org/wp-content/uploads/2015/10/2015-UC-ArcGIS-for-PODS.pdf> (дата обращения: 28.05.2015).
3. Oracle Database Online Documentation. Linear Referencing System. URL: http://docs.oracle.com/cd/B28359_01/appdev.111/b28400/sdo_lrs_concepts.htm (дата обращения: 28.05.2015).
4. Pipeline Open Data Standards. PODS Pipeline Data Model. URL: <http://www.pods.org/pods-model/what-is-the-pods-pipeline-data-model/> (дата обращения: 28.05.2015).
5. Allen J. I have seen the future of pipeline GIS. URL: <http://www.esri.com/~media/files/pdfs/industries/pipeline/pdfs/have-seen-the-future-pipeline-gis.pdf> (дата обращения: 28.05.2015).
6. U.S. Department of Transportation. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. National Pipeline Mapping System. URL: <https://www.npms.phmsa.dot.gov/About.aspx> (дата обращения: 28.05.2015).
7. Кукало И.А. Привязка географических координат подвижного объекта к участку линейной части магистрального нефтепровода // Трубопроводный транспорт-2015: матер. X Междунар. учебно-научно-практ. конф. – Уфа, 2015. – С. 136–138.
8. Дворкин В.В., Карутин С.Н., Куршин В.В. Методика мониторинга глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС с помощью системы дифференциальной коррекции и мониторинга // Измерительная техника. – 2012. – № 3. – С. 32–37.
9. ПЗ-90.11. Параметры Земли 1990 года. Справочный документ. – М.: 27 ЦНИИ, 2014. – 52 с.
10. National geospatial-intelligence agency (NGA) standardization document. World Geodetic System 1984. Version 1.0.0. 2014–07–08. URL: http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0_0_WGS84.pdf (дата обращения: 28.05.2015).
11. Borre K., Strang G. Linear algebra, geodesy, and GPS. – USA: Wellesley-Cambridge Press, 1997. – 624 p.
12. Vincenty T. Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations. URL: http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/inverse.pdf (дата обращения: 28.05.2015).
13. ГОСТ 32453–2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек. – М.: Стандартинформ, 2014. – 20 с.
14. Перепелица В.А., Тебуева Ф.Б. Дискретная оптимизация и моделирование в условиях неопределенности данных: монография. – М.: Академия естествознания, 2007. – 152 с.
15. Weisstein E.W. Point-Line Distance 3-Dimensional. MathWorld – A Wolfram Web Resource. URL: <http://mathworld.wolfram.com/Point-LineDistance3-Dimensional.html> (дата обращения: 28.05.2015).
16. Maplesoft Online. Projection of a Vector onto a Plane. URL: <http://www.maplesoft.com/support/help/Maple/view.aspx?path=MathApps%2FProjectionOfVectorOntoPlane> (дата обращения: 28.05.2015).
17. Михеев С.Е. Численные методы. URL: <http://www.ap-math.spbu.ru/ru/staff/mikheev/files/numet6.pdf> (дата обращения: 28.05.2015).
18. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2012. – 635 с.
19. Госгортехнадзор России. Правила охраны магистральных трубопроводов // Библиотека стандартов, технических нормативно-правовых актов, действующих на территории РФ. URL: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2984/ (дата обращения: 28.05.2015).
20. Кукало И.А., Гривцов С.Н. Оценка рисков физической безопасности линейной части магистрального нефтепровода // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 5. – С. 30–42.
21. OpenStreetMap – некоммерческий веб-картографический проект по созданию подробной свободной и бесплатной географической карты мира. URL: <https://www.openstreetmap.org> (дата обращения: 28.05.2015).

Поступила 29.06.2015 г.

UDC 004.492.2

LINEAR REFERENCING OF MOVING OBJECT GEO-COORDINATES TO THE LINEAR PART OF THE MAIN OIL PIPELINES

Ivan A. Kukalo,

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
40, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: i@kukalo.ru

Sergey N. Grivtsov,

JSC «Transneft – Central Siberia», 24, Naberezhnaya Ushayki Street, Tomsk,
634050, Russia. E-mail: GrivtsovSN@tom.transneft.ru

The necessity of dynamic management of a large number of equipment and personnel performing the construction, repair, prevention and screening measures on pipelines makes the task of «snap» of moving object geographical coordinates to the linear part of the main pipeline urgent.

The main aim of the study is to develop the linear mapping technique of the moving object geographical coordinates to the linear part of the main pipeline, based on the data on a discrete set of its specific geographical origin.

The methods used in the study: vector algebra, geometry of the Earth spheroid, arithmetic error, heuristic methods of direct search methods of data compression, linear interpolation functions.

The results. The authors have stated the problem of linear mapping coordinates of a moving object to the linear part of the main pipeline. The paper describes the methods of solving this problem based on the data on a discrete set of geographical coordinates of kilometer stretch of the linear part of the main pipeline and introduces the results of using the method for converting the data of aerovisual observation of the site of the linear part of the main pipeline «Aleksandrovsky – Anzhero-Sudzhensk»; considers the interpolation properties of the technique with a lack of information on the geographical coordinates of kilometer stretch of the linear part of the main pipeline. The authors estimated the error of the method based on these assumptions, which does not take into account the elliptical shape of the earth in the calculation of the distance between two points on the earth's surface. The estimation error for the data of aerovisual observation site of the linear part of the main pipeline «Aleksandrovsky – Anzhero-Sudzhensk» was calculated. The authors proposed the method for processing information on a set of geographical coordinates of the mobile object based on the limit value of the object distance from the axis of the linear part of the main pipeline for the given configuration of pipelines security zones. It is shown that the sharing of the developed technique of linear mappings and data processing method makes it possible to compress the data on the trajectory of the moving object after converting them into a variety of areas surveyed of the linear part of the main pipeline.

Key words:

Oil pipeline, linear referencing system, geographical coordinates, aerial surveillance, data compression with losses.

REFERENCES

1. *Analiz finansovogo sostoyaniya i rezultatov deyatel'nosti gruppy OAO «AK "Transneft"»* [Analysis of financial condition and results of operations of OJSC «AK "Transneft"»]. Available at: <http://www.transneft.ru/investors/257/> (accessed 28 May 2015).
2. *Utilizing ArcGIS Location Referencing for Pipelines (ALRP)*. Available at: <http://www.pods.org/wp-content/uploads/2015/10/2015-UC-ArcGIS-for-PODS.pdf> (accessed 28 May 2015).
3. *Oracle Database Online Documentation. Linear Referencing System*. Available at: http://docs.oracle.com/cd/B28359_01/appdev.111/b28400/sdo_lrs_concepts.htm (accessed 28 May 2015).
4. *Pipeline Open Data Standards. PODS Pipeline Data Model*. Available at: <http://www.pods.org/pods-model/what-is-the-pods-pipeline-data-model/> (accessed 28 May 2015).
5. Allen J. *I have seen the future of pipeline GIS*. Available at: <http://www.esri.com/~media/files/pdfs/industries/pipeline/pdfs/have-seen-the-future-pipeline-gis.pdf> (accessed 28 May 2015).
6. *U.S. Department of Transportation. Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration. National Pipeline Mapping System*. Available at: <https://www.npms.phmsa.dot.gov/About.aspx> (accessed 28 May 2015).
7. Kukalo I.A. Privyazka geograficheskikh koordinat podvizhnogo obekta k uchastku lineynoy chasti magistralnogo nefteprovoda [Binding of geographical coordinates of the movable object to the linear part of the main pipeline]. *Materialy X Mezhdunarodnoy uchebno-nauchno-prakticheskoy konferentsii «Truboprovodnyy transport-2015»* [Proc. 10th Int. educational and scientific-practical Conf. Pipeline transport-2015]. Ufa, 2015. pp. 136–138.
8. Dvorkin V.V., Karutin S.N., Kurshin V.V. Metodika monitoringa globalnoy navigatsionnoy sputnikovoy sistemy GLONASS s pomoshchyu sistemy differentsialnoy korrektsii i monitoringa [Method for monitoring the GLONASS global navigation satellite system by means of a differential correction and monitoring system]. *Measurement Techniques*, 2012, no. 3, pp. 32–37.
9. PZ-90.11. *Parametry Zemli 1990 goda. Spravochnyy dokument* [The parameters of the Earth in 1990. Background paper]. Moscow, 27 TsNII Press, 2014. 52 p.
10. *National geospatial-intelligence agency (NGA) standardization document. World Geodetic System 1984. Version 1.0.0. 2014-07-08*. Available at: http://earth-info.nga.mil/GandG/publications/NGA_STND_0036_1_0_0_WGS84/NGA.STND.0036_1.0.0_WGS84.pdf (accessed 28 May 2015).
11. Borre K., Strang G. *Linear algebra, geodesy, and GPS*. USA, Wellesley-Cambridge Press, 1997. 624 p.
12. Vincenty T. *Direct and Inverse Solutions of Geodesics on the Ellipsoid with application of nested equations*. Available at: http://www.ngs.noaa.gov/PUBS_LIB/inverse.pdf (accessed 28 May 2015).
13. GOST 32453–2013. *Globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Sistemy koordinat. Metody preobrazovaniy koordinat opredelyaemykh tochek* [State Standard 32453–2013. Global Navigation Satellite System. Coordinate system. Methods of coordinate transformations defined by points]. Moscow, Standartinform, 2014. 20 p.
14. Perepelitsa V.A., Tebueva F.B. *Diskretnaya optimizatsiya i modelirovaniye v usloviyakh neopredelennosti dannykh* [Discrete optimization and modeling in conditions of uncertainty of data]. Moscow, The Academy of Natural Science Publ., 2007. 152 p.
15. Weisstein E.W. *Point-Line Distance 3-Dimensional*. *MathWorld - A Wolfram Web Resource*. Available at: <http://mathworld.wolfram.com/Point-LineDistance3-Dimensional.html> (accessed 28 May 2015).
16. *Maplesoft Online. Projection of a Vector onto a Plane*. Available at: <http://www.maplesoft.com/support/help/Maple/view.aspx?path=MathApps%2FProjectionOfVectorOntoPlane> (accessed 28 May 2015).
17. Mikheev S.E. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Available at: <http://www.apmath.spbu.ru/ru/staff/mikheev/files/numet6.pdf> (accessed 28 May 2015).
18. Bakhvalov N.S., Zhidkov N.P., Kobelkov G.M. *Chislennyye metody* [Numerical methods]. Moscow, Binom. Laboratoriya znaniy Publ., 2012. 635 p.
19. Gosgortekhnadzor Rossii. *Pravila okhrany magistralnykh truboprovodov* [Gosgortekhnadzor Russia. Regulations for protection of pipelines]. *Biblioteka standartov, tekhnicheskikh normativno-pravovykh aktov, deystvuyushchikh na territorii RF* [Library of standards, technical regulations and regulations in force in the territory of the Russian Federation]. Available at: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2984/ (accessed 28 May 2015).
20. Kukalo I.A., Grivtsov S.N. *Otsenka riskov fizicheskoy bezopasnosti lineynoy chasti magistralnogo nefteprovoda* [Risk assessment of linear part physical safety in the main oil pipeline]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2014, vol. 324, no. 5, pp. 30–42.
21. *OpenStreetMap – nekommercheskiy veb-kartograficheskii projekt po sozdaniyu podrobnoy svobodnoy i besplatnoy geograficheskoy karty mira* [OpenStreetMap – a non-profit web-mapping project to create a more free and a free map of the world]. Available at: <https://www.openstreetmap.org> (accessed 28 May 2015).

Received: 29 June 2015.